

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

TELEMETRICKÝ BEZDRÁTOVÝ MODUL TEPLoty PNEUMATIK

TELEMETRIC WIRELESS TIRE TEMPERATURE MODULE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Halgoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Beneš

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Matúš Halgoš

ID: 211420

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Telemetrický bezdrátový modul teploty pneumatik

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Práce se zabývá návrhem bezdrátového modulu pro měření teploty pneumatik s přihlédnutím na použití ve ztížených podmínkách a vyšších rychlostech.

1. Definujte požadavky na měření teploty pneumatik
2. Porovnejte parametry a typy dostupných snímačů
3. Definujte požadavky na senzorický modul
4. Definujte požadavky na bezdrátovou komunikaci
5. Navrhněte a realizujte HW
6. Definujte SW požadavky
7. Implementujte SW
8. Řešení otestujte a zhodnoťte dosažené výsledky

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Katalogové listy k vybraným součástkám.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Beneš

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca sa venuje bezdrôtovej telemetrii, konkrétne jednej časti, ktorou je meranie teploty pneumatík. V jednotlivých kapitolách čitateľovi uvedenie dôvody, kto a za akých okolností z týchto informácií môže benefitovať, približuje čitateľovi spôsoby akými je možné teplotu merať, spracovávať a odosielať. V ďalších kapitolách priblíži čitateľovi výber súčiastok použitých pri návrhu. A v poslednej časti sa venuje návrhu hardware a software batériou napájaného modulu na meranie teploty pneumatík, ktorý je časťou dataloggeru, zhromažďujúceho jazdných údajov vozidla.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

telemetria, datalogger, senzor, teplota, motocykel, STM32, NRF24L01, MLX90614

ABSTRACT

This work dedicates wireless telemetry, specifically one part, which is the measurement of tire temperature. In the individual chapters, giving the reader the reasons who and under what circumstances can benefit from this information introduces the reader to the ways in which the temperature can be measured, processed and sent. In the following chapters, the reader will be introduced to the selection of components used in the design. And the last part deals with the design of hardware and software of the battery-powered module for measuring the temperature of tires, which is part of the datalogger, which collects vehicle driving data.

KEYWORDS

telemetry, datalogger, sensor, temperature, motobike, STM32, NRF24L01, MLX90614

HALGOŠ, Matúš. *Telemetrický bezdrátový modul teploty pneumatik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2021, 56 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Tomáš Beneš

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Matúš Halgoš
VUT ID autora: 211420
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Telemetrický bezdrátový modul teploty pneumatik

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno
podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Tomášovi Benešovi za odborné vedenie, konzultácie a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Teoretický rozbor	14
1.1 Dôvody merania teploty pneumatík	14
1.2 Komerčne dostupné dátové koncentráto	14
1.3 Porovnanie dostupných snímačov	16
1.3.1 Dotykové	16
1.3.2 Bezdotykové	17
1.4 Prieskum trhu	17
1.5 Požiadavky na meranie	18
1.6 Požiadavky na senzorický modul	19
1.7 Komunikácia so senzorom	20
1.7.1 Štart - Stop sekvencia	20
1.7.2 ACK, NACK	20
1.7.3 Postup posielania informácie do zariadenia	20
1.7.4 Postup získavania informácie zo zariadenia	21
1.8 Bezdrôtová komunikácia - požiadavky	21
2 Výber komponentov	23
2.1 Senzor	23
2.2 Vysielač/prijímač	24
2.2.1 Komunikácia s nRF24L01	24
2.3 MCU	25
2.4 Batéria	25
2.5 Power management	25
2.5.1 Lineárny regulátor TPS70933	26
2.5.2 Nabíjací čip BQ21040	26
3 Návrh	27
3.1 Bloková schéma	27
3.1.1 Funkčný popis blokov	27
3.2 Návrh schémy	28
3.2.1 Mikrokontrolér STM32L031K6T6	28
3.2.2 Senzor a ochrana komunikácie	28
3.2.3 Bezdrôtový vysielač/prijímač nRF24L01	29
3.2.4 Nabíjanie batérie	30
3.2.5 Odpájací obvod	31

3.3	DPS	32
4	Požiadavky na software	34
5	Návrh software	35
5.1	Programovacie prostredie	35
5.2	Knižnica HAL	35
5.3	HAL_GPIO	36
5.4	HAL_SPI	36
5.5	Registre MLX + I2C	37
5.6	Pripojenie k dataloggeru	38
5.7	Priebeh programu	39
5.7.1	Power down módu	40
6	Priebeh oživovania	42
6.1	Priebeh testovania funkčnosti	43
	Záver	45
	Literatúra	46
	Zoznam symbolov a skratiek	49
	Zoznam príloh	50
A	Schéma zapojenia	51
B	Doska plošných spojov	53
C	Obsah príloženého CD	56

Zoznam obrázkov

1	Ukážka telemetrických dát [1]	12
2	Rozmiestnenie senzorov s bezdrôtovým dataloggerom [2]	13
1.1	Datalogger AiM EVO5 [4]	15
1.2	Infračervený teplotný senzor AiM na meranie teploty pneumatík [5]	16
1.3	Ukážka prenesenia jedného bytu s potvrdením [17]	20
1.4	Poslanie jedného bytu do zariadenia[17]	21
1.5	Načítanie jedného bytu zo zariadenia[17]	21
2.1	Senzor Melexis MLX90614-ESF-BAA[13]	23
2.2	Bloková schéma vnútorného obvodu senzoru[13]	24
2.3	Bloková schéma komunikácie SPI[19]	25
3.1	Bloková schéma	27
3.2	Schéma zapojenia MCU	28
3.3	Schéma senzoru spolu s ochranným obvodom	29
3.4	Schéma zapojenia nRF24L01	30
3.5	Schéma nabíjacieho obvodu	30
3.6	Schéma odpájacieho obvodu	32
3.7	Pôvodná DPS	33
3.8	DPS po revízii	33
3.9	Vrchná strana návrhu dosky plošného spoja z programu Fusion 360	33
5.1	Rozloženie vstupno výstupných pinov v prostredí STM32cubeIDE	35
5.2	Ukážka prekrývajúcich sa pásiem [24]	38
5.3	Adresovanie RX, TX registrov [18]	39
5.4	Vývojový diagram chodu programu	41
6.1	Odoslanie jedného bytu (0x55), modrá-SCK, žltá-MOSI, fialová-CE	42
6.2	Fotka plne osadenej dosky	43
6.3	Výstrižok z debugovacieho prostredia	44
B.1	Vrchná vrstva medi - TOP	53
B.2	Spodná vrstva medi BOT	53
B.3	Soldermask - TOP	54
B.4	Soldermask - BOT	54
B.5	Plán osadzovania - TOP	55
B.6	Plán osadzovania - BOT	55

Zoznam tabuliek

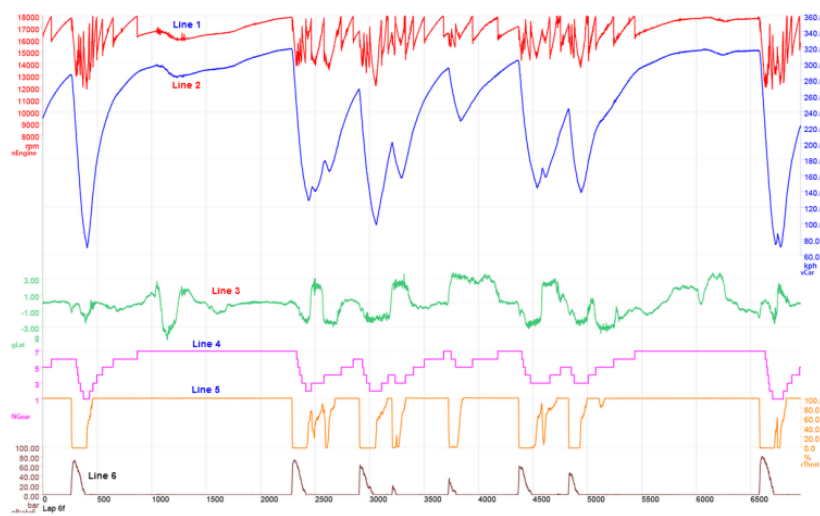
1.1	Senzory TE Connectivity	18
1.2	Senzory Melexis MLX90614-*	18
1.3	Senzory firmy Amphenol Advanced Sensors	18

Zoznam výpisov

5.1	Funkcia inicializujúca prostredie HAL	36
5.2	Funkcia nastavujúca konkrétny GPIO pin	36
5.3	Funkcia odosielajúca hodnoty po zbernici SPI	36
5.4	Funkcia nastavujúca počiatočný stav NRF24L01	37
5.5	Funkcia nastavujúca počiatočný stav NRF24L01	37
5.6	Funkcia nastavujúca počiatočný stav NRF24L01	37
5.7	Funkcia, ktorá získava hodnoty z registru po zbernici I2C	37
5.8	Funkcia nastavujúca komunikačný kanál	38
6.1	Funkcia odosielajúca hodnoty po zbernici SPI	43

Úvod

Telemetria už dlhé roky zaistuje v motoršportových sériach získavanie dát z rôznych senzorov, ktoré pomáhajú pretekárom mať prehľad o stave jeho vozidla. V sériovo vyrábaných vozidlách sa táto technológia vyskytuje len veľmi zriedka. Účelom bezdrôtovej telemetrie je poskytnúť vodičovi informácie o vozidle ktoré potrebuje, bez zanechania trvalých mechanických zásahov. V prípade, že vodič auta alebo jazdec na motocykli má záujem dáta o svojej jazde zbierať, má možnosť si kúpiť komerčne vyrábaný datalogger, ktorého cena sa pohybuje od 1 000€



Obr. 1: Ukážka telemetrických dát [1]

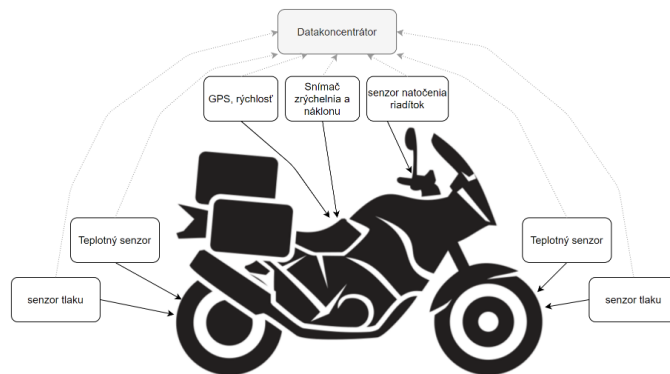
Graf telemetrie je zložený z jednotlivých meraných údajov, ktoré sú vykresľované do samostatných grafov. Na obrázku 1 sa jedná konkrétne tieto merané hodnoty:

- červená - otáčky motora
- modrá - rýchlosť vozidla
- zelená - bočné sily pôsobiace na vozidlo
- ružová - zaradený prevodový stupeň
- žltá - pozícia plynového pedálu
- hnedá - tlak v brzdovom potrubí

Tieto údaje sú väčšinou k dispozícii z riadiacej jednotky vozidla. Pripojením externých senzorov a ich vhodným rozmiestnením je možné získavanie dát ako sú napríklad teplota pneumatík, brzdových kotúčov, tlak v pneumatikách, GPS polohu vozidla a podobne.

Hlavnou nevýhodou týchto dataloggerov je spôsob komunikácie medzi senzormi, ktorý je väčšinou zbernicového typu. Kým u pretekárskych vozidlách sa už pri ich vývoji uvažuje o rozmiestnení senzorov a káblov vedených k nim, napríklad na úkor

úložného priestoru, tak pri bežne používaných motorkách je vedenie dátových zberníc nepraktickým riešením. Riešenie by mohlo spočívať v bezdrôtovej komunikácii medzi senzormi a dataloggerom a jednotlivé senzory by boli napájané z batérie a mohli byť navrhnuté ako odnímateľné. Na obrázku 2 je zobrazené rozmiestnenie senzorov



Obr. 2: Rozmiestnenie senzorov s bezdrôtovým dataloggerom [2]

Telemetrický bezdrôtový modul teploty pneumatík je funkčnou časťou bloku, ktorý sa zameriava na získavanie aktuálnej teploty pneumatiky a tieto hodnoty posiela bezdrôtovo na centrálny datalogger.

Táto práca sa bude zaoberať:

- teplotnými senzormi
- komunikáciou medzi MCU a jednotlivými časťami
- výberom vhodných komponentov
- popisom funkcie
- návrhom

1 Teoretický rozbor

Pri jazde vozidlom pneumatiky zabezpečujú prenos síl medzi vozovkou a vozidlom. Pneumatiky majú podstatný vplyv na jazdné vlastnosti vozidla, či už sa jedná o motocykel, alebo auto a zvlášť to platí pri športových vozidlách. Na to, aby vozidlo dokázalo spoľahlivo akcelerovať, decelerovať a bezpečne prechádzať zákruty, je nutné aby pneumatiky mali parametre vhodné pre daný štýl jazdy. Jedným z týchto parametrov je teplota. Správna teplota pneumatík môže mať priaznivý dopad na jazdné vlastnosti najmä, pri športovo ladenej jazde. Znalosť okamžitej teploty pneumatík, prípadne grafu teploty v kombinácii s rýchlosťou alebo pôsobiacimi silami na vozidlo, môžu tvoriť obraz o štýle jazdy alebo o aktuálnom stave pneumatík.

1.1 Dôvody merania teploty pneumatík

Jednou zo základných vlastností každej pneumatiky je jej teplota, ktorá sa počas jazdy mení. Vlastnosť, ktorá zabezpečuje priľnavosť pneumatiky sa nazýva adhézia. Zmena teploty pneumatiky vplýva na výslednú adhéziu. O dôležitosti zahriatia pneumatík svedčí aj to, že jazdci Formule 1, ako aj moto GP pred samotným pretekom absolvujú zahrievacie kolo, v ktorom je okrem iného dôležité dostať pneumatiky do prevádzkovej teploty.

Teplota pneumatiky môže mať na jej životnosť aj nepriaznivý dopad. Pneumatiky, ktoré sú vystavené vysokým teplotám len krátkodobo, sú schopné túto teplotu rozptýliť do okolia. Čím vyšším teplotám sú vystavené, tým je vyššia šanca, že materiál stratí svoje vlastnosti a vznikne trvalé poškodenie. [6, 7]

Meranie teploty pneumatík môže mať využitie aj pri bežnej prevádzke, kedy by ním bolo možné zistiť nadmerné prehrievanie zapríčinené napríklad čiastočne zaseknutou brzdou. Ďalej by bolo možné odhaliť nesprávne nahustené koleso alebo stratu tlaku v pneumatike, čo spôsobuje vyšší kontakt s vozovkou a tým pádom sa koleso zahrieva viac ako ostatné. Nesprávna geometria môže tiež vyvolávať nadmerné opotrebenie pneumatík, ktoré by mohlo byť detekované ešte predtým ako vodič navštívi STK, alebo ešte predtým ako sa dostaví nadmerné opotrebenie pneumatiky.

1.2 Komerčne dostupné dátové koncentrátory

Pokiaľ sa jazdec rozhodne pre použitie datalogeru na svojom motocykli, zo začiatku by si mal premyslieť, do akej úrovne získané dáta využije a na základe toho sa môže vhodne rozhodnúť, pre rozsah informácií, ktoré daný datalogger ponúka. V dnešnej dobe už prevažná väčšina výrobcov dodáva datalogger minimálne pre ich pretekárske špeciály. Čo sa týka sériovo vyrábaných modelov, tak takmer všetky obsahujú čidlá

v motore minimálne na meranie teploty, tlaku oleja, ale len málokto umožňuje užívateľovi vidieť tieto dáta v čase a na základe toho analyzovať či už svoju jazdu, alebo celkový výkon motocykla. Záujemca má na výber zo širokej skupiny komerčne dodávaných datalogerov, pri ktorých má záujemca na výber od jednoduchého zariadenia na mernie času kôl, až po sofistikované zariadenie, ktoré je možné pripojiť priamo na riadiacu jednotku a z nej získavať informácie o stave motora, prevodovky, tlakov prevádzkových kvapalín a podobne. Medzi najúspešnejších výrobcov v tejto oblasti patria taliansky AiM, austrálsky MoTec alebo nemecký 2D. Okrem dát získavaných z riadiacej jednotky je možné k väčšine dataloggerom pripojiť externé senzory. Cena dataloggerov začína od 580€.[3]



Obr. 1.1: Datalogger AiM EVO5 [4]

Na obrázku 1.1 je zobrazený datalogger využívaný v pretekárskych sériach. Jeho cena je približne 1450€.

Na obrázku 1.2 je zobrazený senzor na meranie teploty pneumatík. Hlavným rozdielom tohto senzoru od modulu popisovanom v tejto práci je, že k tomuto senzoru je potrebná CAN zbernica a samotný datalogger na ktorý sa senzor pripojí. Ďalšou odlišnosťou je, že pri inštalácii je nutné zakomponovať kabeláž, ktorá by mohla narušiť celkový vzhľad vozidla. Cena jedného senzoru sa pohybuje okolo 100€.



Obr. 1.2: Infračervený teplotný senzor AiM na meranie teploty pneumatík [5]

1.3 Porovnanie dostupných snímačov

Meranie teploty elektrickými teplomermi môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín Literatúra [8, 9, 10]

1.3.1 Dotykové

Senzor musí byť pripevnený (dotýkať sa) objektu či látky, ktorej teplotu má merať. Využíva sa tu prenos tepla medzi dvomi objektmi. Je možné ho využiť všade tam, kde je ľahký prístup k meranému objektu. Meranie spočíva v prenose tepla z materiálu objektu cez puzdro až na senzor prostredníctvom tepelnej vodivosti. Výhodou je presné meranie a nízky šum z okolia. Nevýhodou je rýchlosť merania, ktorá je závislá na vodivosti puzdra a stála prítomnosť fyzického kontaktu s objektom pri meraní. Dotykové senzory teploty sú ďalej rozdelené na:

- Odporové kovové: fungujú na princípe lineárnej závislosti kovu na teplote
- Polovodičové (termistory): pracujú na princípe závislosti elektrického odporu od teploty
- CMOS senzory
- Termistory: využívajú pre svoju funkciu Seebeckov jav, pri ktorom spojením dvoch vodičov na koncoch vzniká elektrické napätie

Dotykovým senzorom teploty sa práca venovať nebude, pretože pre meranie by

bolo potrebné senzor vkladať do kolesa, čo by značne sťažilo manipuláciu s ním.

1.3.2 Bezdotykové

Senzor je umiestnený v určitej vzdialenosti od meraného objektu a tým nedochádza k vzájomnému ovplyvňovaniu, preto sa spoľahlivo využívajú tam, kde bežné dotykové senzory už nedokážu teplotu snímať. Snímajú teplotu od -40 do 10 000 °C. Bezdotykové meranie výhody oproti dotykovému meraniu najmä v rýchlosti (v rádoch milisekúnd), ďalej dokáže merať pohybujúci sa predmet a medzi predmetom a senzorom nedochádza k fyzickej interakcii. Nevýhodou je nutnosť chrániť optiku senzoru pred nečistotami a poškodením. Rozdeľujú sa na:

- Infračervené termočlánky: fungujú na princípe dopadajúcich fotónov na citlivú časť senzoru ktorú zahrejú. Čím vyššia je teplota, tým viac energie IR sa emituje. Termočlánkový snímací prvok zložený z malých termočlánkov na kremíkovom čipe absorbuje energiu, zahriatu časť potom meria dotykový senzor a produkuje výstupný signál. Typický rozsah je od -40 do 1050 °C. Hlavnými výhody sú malé puzdro, presnosť merania okolo 0,5 °C a nízka cena.
- Pyroelektrické senzory: využíva sa tu princíp pyrometrie, tj. spontánnej polarizácie pri zmene teploty. Konštrukcia pripomína kondenzátor. Je tvorený dvomi elektródami medzi ktorými je pyroelektrikum na ktorý keď dopadne infračervené žiarenie, tak sa na elektródach vytvorí náboj, ktorý sa následne vybíja cez merací rezistor a prechádza k ďalšiemu spracovaniu. Rozsah teplôt je od -40 až do 400°C, nevýhodou je že senzor je nutné pri odčítaní zatieniť. Rozsah vstupných napätí od 1,75 do 8 V, Výhodou je vysoká presnosť a nevýhodou je pomerne vysoká cena.
- Kvantové senzory infračerveného žiarenia: využíva polovodičové materiály, ktoré priamo interagujú s dopadajúcim žiarením.
- Bolometry: pri dopade fotónov energia zahreje citlivú dosku, na ktorej sú pomocou tenkovrstvých technológií nanosené citlivé odporové vrstvy, tá mení svoj odpor so zmenou teploty. Bolometer je vhodný na veľmi presné meranie teploty.

1.4 Prieskum trhu

Infračervené termoelektrické senzory sú pri podobných zapojeniach používané najčastejšie. Bolometry sa používajú pri infračervených kamerách senzory na báze pyrometrie sú najčastejšie používané pri detekcii ohňa a plynu. Kvantové detektory sú veľmi presné a používajú pri meraní teplôt v rádoch tisícoch °C. Zároveň sú puzdra

chladené, aby bolo možné dosiahnuť presné hodnoty. Na európsky trh sú najčastejšie dodávané senzory od firiem TE Connectivity, Amphenol Advanced Sensors a Melexis. Firmy Melexis a TE sa zaoberajú výrobou senzorov, ktoré spĺňajú podmienky automotive, to znamená, že ich je možné použiť v náročných podmienkach. Sensory od Amphenol Advanced Sensors túto vlastnosť nemajú deklarovanú. Výhodou senzorov od Melexis je vnútorne integrovaný prevodník, ktorý komunikuje cez komunikačný protokol I2C, čo značne zjednodušuje zber dát zo senzoru.

Čerpané z datasheetov senzorov [11, 12, 13, 14, 15, 16]

Tab. 1.1: Sensory TE Connectivity

Názov	T _{OBJ} [°C]	T _{AMB} [°C]	Typ	FOV [°]	Puzdro	Cena[€]
G-TPCO-032	-40 - 300	-20 - 85	NTC	110	TO-18	5,84
G-TPCO-035	-40 - 300	-20 - 85	Ni - RTD	110	TO-18	10,30

Tab. 1.2: Sensory Melexis MLX90614-*

Názov*	T _{OBJ} [°C]	T _{AMB} [°C]	U[V]	I [mA]	FOV[°]	Puzdro	Cena[€]
DCI	-70 - 380	-40 - 85	3	1,3	5	TO-39	37,45
BAA	-70 - 380	-40 - 85	3	1,3	70	TO-39	11,97
BCC	-70 - 380	-40 - 85	3	1,3	35	TO-39	17,35
AAC	-70 - 380	-40 - 85	5	1,3	35	TO-39	17,35

Tab. 1.3: Sensory firmy Amphenol Advanced Sensors

Názov	T _{SENSE} [°C]	R _{MIN} [kΩ] Pri -20°C	R _{MAX} [kΩ] Pri 100°C	FOV[°]	Puzdro	Cena[€]
ZTP-135L	-20 - 100	875,5	6,61	86	TO-5	6,01
ZTP-135BS	-20 - 100	931,5	6,51	85	TO-5	5,64
ZTP-135H	-20 - 100	947,9	6,38	86	TO-5	5,4

1.5 Požiadavky na meranie

Pre dosiahnutie správnych výsledkov by mal senzor spĺňať nasledujúce požiadavky: pretože k meraniu bude dochádzať pri rôznych poveternostných podmienkach, zmenách atmosférického tlaku, dažďa, prípadne sneženia. Pričom tieto okolnosti prinášajú do merania určité chyby, je preto dôležité, aby zariadenie bolo schopné aj v

týchto podmienkach dosahovať stabilné výsledky, teda aby nameralo správnu hodnotu aj pri náhlej zmene podmienok. Je dôležité zabezpečiť, aby senzor za každých podmienok snímal len teplotu pneumatík a predišlo sa tak chybe spôsobenej meraním iných prvkov vozidla. Teplota pneumatík sa v závislosti od jazdy mení rôzne a pri jej meraní je nutné, aby bola aktuálna teplota odčítaná v čo najkratšom čase aby sa predišlo časovému skresleniu.

1.6 Požiadavky na senzorický modul

Kľúčovým prvkom celej zostavy je senzor teploty. Preto, aby bola zaistená funkcia aj v teplotne náročných podmienkach bolo nutné stanoviť podmienky pre prevádzkovú teplotu a teplotu okolia nasledovne:

- Teplota okolia $-15 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Rozsah merateľnej teploty $-30 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pre zaistenie malej veľkosti a flexibility je dôležité, aby bol senzor schopný fungovať aj pri napájaní z batérie, pri napájacom napätí 3,3 V. Výhodou, nie však nutnosťou je funkcia „sleep mode“, ktorá zníži odoberaný prúd na minimum. Funkcia môže byť nahradená spínaním pinu MCU. Pri návrhu je od začiatku kladený vysoký dôraz na celkovú veľkosť, preto by senzor nemal presahovať priemer 15 mm a výšku 10 mm. Dôležitým parametrom pre presné snímanie teploty je uhol snímania FOV (Field of view) a potom, keď je známa šírka pneumatiky, tak podľa vzorca:

$$s = \frac{d}{2 \tan\left(\frac{FOV}{2}\right)} \quad (1.1)$$

kde d je maximálna vzdialenosť od meraného objektu a s je šírka meraného objektu, vieme pri známej konštante FOV vypočítať maximálnu vzdialenosť senzoru od pneumatiky. Infračervené senzory s týmito parametrami sa pohybujú cenovo od 5 do 40€. Pre účely tejto práce bude vybratý senzor z dolnej hranice ceny najmä kvôli tomu, že modul sa nebude prichytávať k vozidlu napevno a hrozí jeho strata. Senzory od firmy TE Connectivity by sa kvôli snímaciemu uhlu 110° (pri šírke pneumatiky cca 20 cm) museli uchytávať v maximálnej vzdialenosti 6,3cm od pneumatiky. Pri tejto vzdialenosti by pri prejazde výtlku hrozilo zničenie senzoru. Senzory od firmy Amphenol Advanced Sensors nespĺňajú podmienku maximálnej, merateľnej teploty a tiež by ich bolo nutné namontovať do vzdialenosti 9,65cm. Pre účel tejto práce bol vybratý senzor MLX90614-ESF-BAA od firmy Melexis ktorý spĺňa všetky predchádzajúce podmienky ktorého snímacia vzdialenosť je do 14,28 cm, čo zodpovedá uchytaniu pod ŠPZ.

1.7 Komunikácia so senzorom

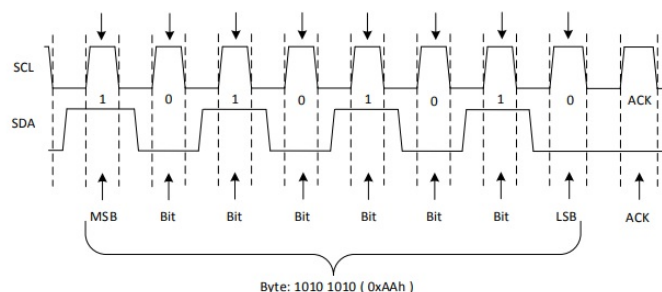
Senzory Melexis majú integrovaný komunikačný protokol I2C. Jedná sa o obojsmernú tzv. Master-Slave komunikáciu. Procesor (master) komunikuje pomocou 7-bitovej adresy až so 127 zariadeniami (slave). Každý slave má unikátnu adresu, aby master dokázal rozlíšiť, ktorému zariadeniu posielal informáciu, alebo z ktorého zariadenia ide informáciu vyčítať. Rozhranie sa skladá z dvoch vodičov SDA (serial data) a SCL (serial clock), ktoré musia byť pripojené na pullup rezistory. Zariadenie začne komunikovať až potom keď ho o to master požiada.

1.7.1 Štart - Stop sekvencia

Začiatok každej komunikácie začína preklopením logickej hodnoty SDA z 1 na 0 v stave SCL = log. 1. Po odoslaní posledného bytu je SDA opäť preklopené do stavu log. 1, čím sa signalizuje ukončenie komunikácie a uvoľnenie komunikačnej dráhy.

1.7.2 ACK, NACK

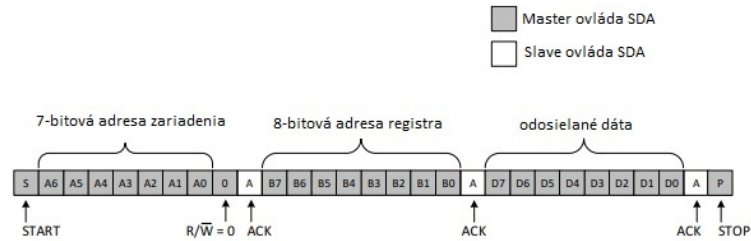
Potvrdenie alebo nepotvrdenie prijatia informácie signalizuje v poradí 9. bit. V prípade potvrdenia je SDA nastavené na log. 0 a v prípade nepotvrdenia na log. 1.



Obr. 1.3: Ukážka prenesenia jedného bytu s potvrdením [17]

1.7.3 Postup posielania informácie do zariadenia

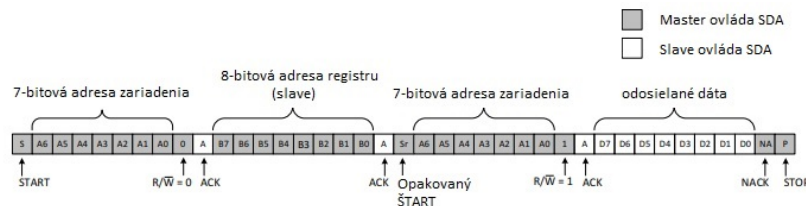
- Master iniciuje komunikáciu zaslaním signálu štart a adresy zariadenia. 8. bit po adrese nasleduje tzv. R/W ktorý je nastavený na log. 0 čo signalizuje zápis (write).
- Master pošle informáciu do zariadenia.
- Master ukončuje komunikáciu zaslaním stop signálu.



Obr. 1.4: Poslanie jedného bytu do zariadenia[17]

1.7.4 Postup získavania informácie zo zariadenia

- Master iniciuje komunikáciu zaslaním signálu štart a adresy zariadenia. R/W nastavený na log. 1
- Master odošle adresu registra do ktorého chce informáciu uložiť.
- Pri zariadení s viacerými registrami sa odošle aj adresa registra z ktorého sa plánuje informácia získavať.
- Zariadenie informáciu odošle.
- Master ukončuje komunikáciu zaslaním stop signálu.



Obr. 1.5: Načítanie jedného bytu zo zariadenia[17]

Čerpané z literatúry [17].

1.8 Bezdrôtová komunikácia - požiadavky

Zariadenie musí na komunikáciu používať verejne prístupné frekvenčné pásma. Výkon vysielaný zo zariadenia nesmie prekročiť maximálny povolený výkon pre konkrétne frekvenčné pásmo stanovený vyhláškou. Vzhľadom k tomu, že medzi dataloggerom a senzorom bude prenášaná informácia len niekoľko bytov, nie je kladený vysoký dôraz na šírku pásma. Predpokladá sa, že zariadenie spolu s dataloggerom budú vo vozidle. Dosah zariadenia by mal byť od 20 m. Zariadenie musí byť kompatibilné na základe vysielacieho a prijímacieho protokolu spolu s dataloggerom. Pri

odosielaní teploty pneumatík sa nejedná o citlivé dáta, napriek tomu je možné ich zabezpečiť dvomi spôsobmi:

- Signál bude mať dosah len na krátku vzdialenosť alebo
- Dáta budú pred odoslaním zašifrované

2 Výber komponentov

Ako hlavný parameter pre finálny konštrukčný návrh bola stanovená veľkosť. Teda zariadenie bude musieť fungovať s pomerne malou batériou, pri ktorej sa predpokladá, že zariadenie bude vysielat 6 krát za minútu, bude teda väčšinu času v sleep móde, v ktorom je dôležité zariadenie odoberalo čo najmenší výkon. Preto všetky komponenty boli vyberané s prihliadnutím na tento faktor. V tejto kapitole budú približené parametre súčiastok a popísaný postup ich výberu.

2.1 Senzor

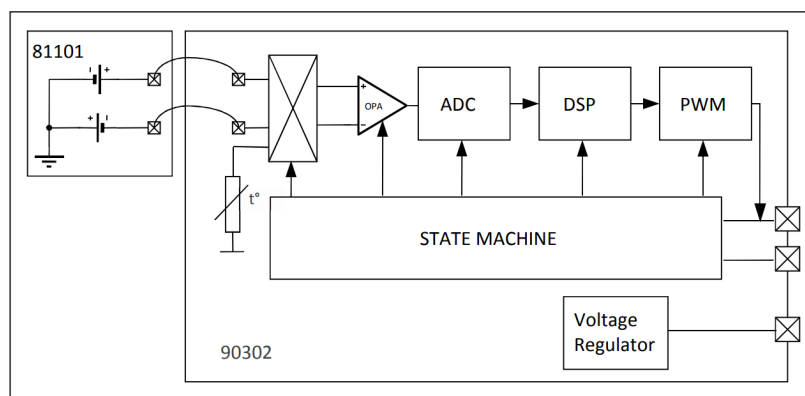
Čerpané z datasheetu senzoru [13]

Ako bolo spomenuté v kapitole 1.6, pre účely tejto práce bol vybraný senzor od firmy Melexis typ MLX90614-ESF-BAA, ktorý je napájaný 3,3 V. Tento senzor je vybavený sleep módom, v ktorom má prúdový odber len 2,5 μA . Senzor sa k mikrokontroléru pripája cez PWM alebo cez integrovaný komunikačný protokol I2C, cez piny SDA a SCL. O funkciu spracovania nameranej teploty na výstup v



Obr. 2.1: Senzor Melexis MLX90614-ESF-BAA[13]

podobe PWM a I2C sa stará vnútorný obvod, ktorý riadi stavový automat. Výstup z infračerveného senzoru je navzorkovaný 17-bitovým A/D prevodníkom, ďalej je filtrovaný a zosilnený nízkofrekvenčným zosilňovačom. Signál je následne prevedený cez modulátor do jednobitového toku. Výsledok merania je dostupný vo vnútornej RAM.



Obr. 2.2: Bloková schéma vnútorného obvodu senzoru[13]

2.2 Vysielač/prijímač

Ako vysielač/prijímač bol vybraný, nRF24L01, ktorý bude použitý aj pri ostatných moduloch vrátane dataloggeru. Je to jednočipový nízkovýkonový bezdrôtový čip, ktorý podporuje ako aj vysielanie tak aj prijímanie na frekvencii 2.4 GHz, rýchlosťou až 2 Mb za sekundu s dosahom cca 100 m. Registrová mapa je dostupná procesoru cez SPI. Má integrovaný protokol Enhanced ShockBurst™ ktorý automaticky zaobchádza s predanými hodnotami v registroch a následne ich privedením pulzu po dobu väčšiu ako 10 μ s na pin CE odošle. O potvrdenie odoslaného signálu sa stará autoacknowledgement systém. Pri nastavení nRF ako prijímač, vyhľadáva platnú adresu a potom čo ju nájde, začne demodulovať signál a posieľa ho do FIFO zásobníka, odkiaľ je presunutý do registrov, z ktorých ich cez SPI pošle do MCU. Maximálny odoberaný prúd pri vysielaní je 11.3 mA pri výstupnom výkone 0 dBm, a pri stand-by móde odoberá len 32 μ A.[18]

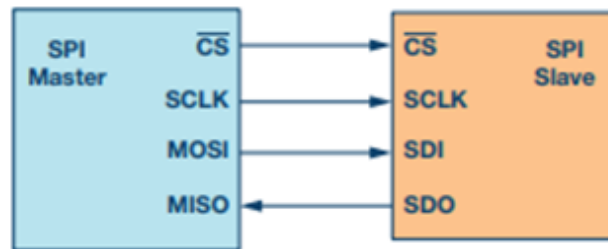
2.2.1 Komunikácia s nRF24L01

Prístup k registrom má NRF24L01 zabezpečený pomocou komunikačného protokolu SPI (serial peripheral interface). Jedná sa o synchronnú full duplex, master-slave komunikáciu. Komunikačné rozhranie sa skladá z minimálne 4 vodičov v závislosti od počtu zariadení s ktorými je komunikované:

- MOSI – prenos dát z nadradeného MCU do zariadenia
- MISO – prenos dát zo zariadenia do nadradeného MCU
- SCLK – sériový časový signál
- CE – určuje, ktoré zariadenie bude komunikovať

Po začatí komunikácie je možné medzi zariadeniami komunikovať simultánne. Prenos dát sa uskutočňuje cez 2 posuvné registre, ktoré sú prepojené tzv. virtuálnou

kruhovou topológiou, kde master LSB je pripojený na slave MSB a slave LSB je pripojený na master MSB. Každým CLK impulzom sa presunie 1 bit a po 8 impulzoch si master vymení 1 byte informácie so zariadením. Jednotlivé bity je možné posielat buď pri nábežnej alebo padajúcej hrane CLK signálu. Bitový posun je tiež možné realizovať pri nábežnej alebo padajúcej hrane. Získavanie dát a posúvanie bitov nesmie prebiehať súčasne.[19]



Obr. 2.3: Bloková schéma komunikácie SPI[19]

2.3 MCU

Na spracovanie vstupno-výstupných signálov, prevod teploty a odosielanie dát do vysielča, bol vybraný 32-bitový Arm procesor STM31L031K6T6 od firmy ST. Je taktovaný nastaviteľným až 16 MHz vnútorným RC obvodom. Disponuje 32 KB flash pamäťou, 8KB RAM a 1KB EEPROM. Na komunikáciu so senzorom a vysielčom budú použité integrované komunikačné protokoly SPI a I2C. Jedná sa nízko-výkonový procesor, ktorého prúdový odber v sleep móde môže klesnúť až na 0,23 μ A. Disponuje vstavanými 12 bitovými A/D prevodníkmi. So senzorom komunikuje po protokole I2C a s vysielčom komunikáciou SPI. [20]

2.4 Batéria

Ako zdroj bude pre túto prácu použitá nabíjateľná jedno-článková Li-Pol batéria s kapacitou 240 mAh. Jej menovité napätie je 4,2 V a bude ju možné odpojiť, keď jej napätie klesne pod 3 V, aby nedošlo k zničeniu batérie. Batériu bude možné dobíjať cez USB-C.

2.5 Power managment

Táto kapitola sa bude zaoberať výberom súčiastok ktoré, sa starajú o napájanie zariadenia.

2.5.1 Lineárny regulátor TPS70933

Všetky komponenty použité pri návrhu je možné napájať napätím 3,3 V, ktoré bude do siete stabilne dodávať lineárny napäťový regulátor od firmy Texas Instruments TPS70933, ktorý dodáva fixovaných 3,3 V pri 0,15 A, čo bude dostatočné pre chod zariadenia. Hlavnými parametrami pri výbere boli presnosť, rozsah použiteľnej teploty a nízky prúdový odber. Výrobcom udávaná presnosť výstupného napätia je 2% pri meniacej sa teplote. Regulátor je možné používať v rozsahu teplôt od -40 do 125 °C. Prúdový odber potrebný pre funkciu regulátoru je len 1 μA , preto je regulátor vhodný pri použití v batériou napájaných zariadeniach. [21]

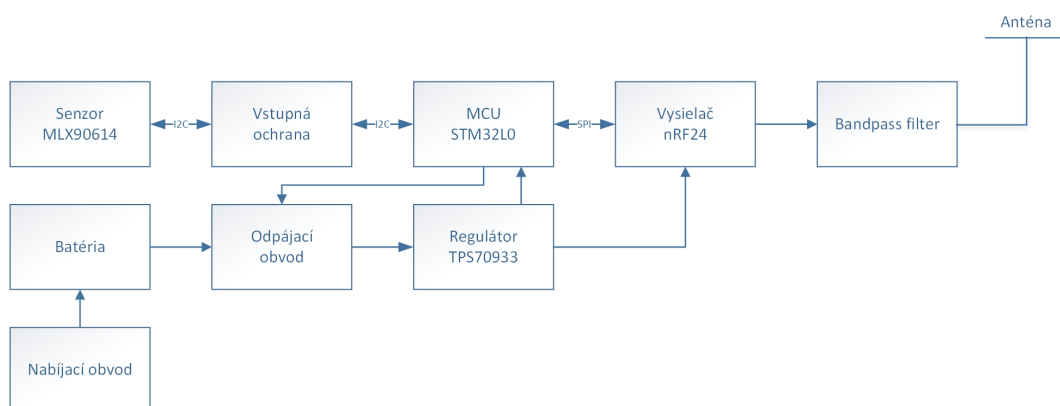
2.5.2 Nabíjací čip BQ21040

Hlavnou časťou nabíjacieho obvodu bude jednočlánkový Li-Pol nabíjací čip od firmy Texas Instruments BQ21040, ktorý po pripojení vstupného napätia bude do batérie dodávať až 0,8 A pri napätí 4,2 V. Má integrovaný pin na ktorý bude pripojená signalizačná LED, ktorá po ukončení nabíjania zhasne.[22]

3 Návrh

V tejto kapitole bude vysvetlený princíp funkcie bezkontaktného teplomeru, popísané bloky blokovej schémy a postup pri návrhu schémy a dosky plošného spoja v programe Autodesk Eagle.

3.1 Bloková schéma



Obr. 3.1: Bloková schéma

3.1.1 Funkčný popis blokov

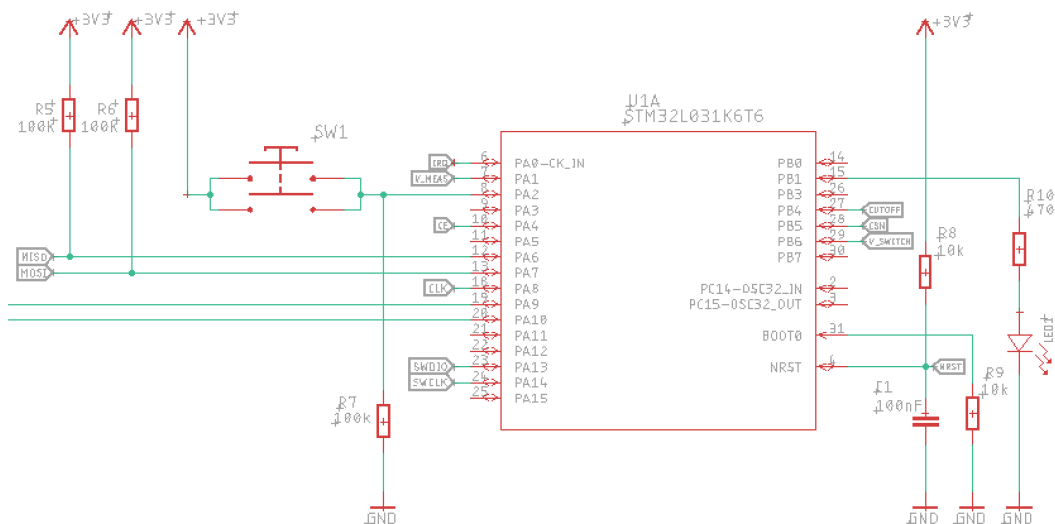
- Senzor MLX90614 – Zaznamená teplotu pneumatiky a odošle ju na spracovanie
- Vstupná ochrana – zaistí, aby sa na vstupno-výstupných pinoch procesoru neobjavilo napätie ktoré je vyššie, ako prípustné
- MCU STM32L0 – komunikuje so senzorom, z ktorého dostáva hodnoty teplôt, prepočítava ich na teplotu a pomocou SPI posiela hodnoty do vysielача. Do MCU tiež prichádza informácia o napätí na batérii, a keď je hodnota menšia ako 3 V pošle signál odpájaciemu obvodu.
- Vysielač nRF24 – zhromažďuje dáta na odoslanie a po privedení impulzu ich cez filter a anténu odošle na datalogger
- Odpájací obvod – zaistuje, aby batéria nepracovala v stave, keď je jej napätie menšie ako 3V, čo zabezpečuje mosfet, ktorý dostáva impulzy z riadiacej jednotky
- Regulátor – konvertuje napätie z 3 - 4,2 V zo vstupu na stabilných 3,3 V na výstupe.
- Nabíjací obvod – po pripojení 5V cez rozhranie USB-C nabíja batériu

3.2 Návrh schémy

Návrh schémy vychádza z blokovej schémy a pre lepšiu čitateľnosť je rozdelená do blokov ktoré majú spoločné súvislosti.

3.2.1 Mikrokontrolér STM32L031K6T6

Návrh funkčných častí procesorovej jednotky vychádza z odporúčania výrobcu, komunikácia so senzorom prebieha cez prostredie I2C pomocou pinov PA9 a PA10. Prostredníctvom SPI MCU komunikuje s vysielateľom cez piny PA6, PA7 a PA8. Signál IRQ je prepojený s vysielateľom, jedná sa o signál aktívny v log. 0 a je ovládaný tromi zdrojmi maskovateľného prerušenia. Vypínačom SW1 je možné zariadenie prepnúť do režimu spánku. LED1 je signalizačná dióda a bude signalizovať prepínanie medzi režimom vysielania a režimom spánku. Naprogramovanie procesoru bude realizované programátorom od ST a bude prebiehať cez prostredie SWD.



Obr. 3.2: Schéma zapojenia MCU

3.2.2 Senzor a ochrana komunikácie

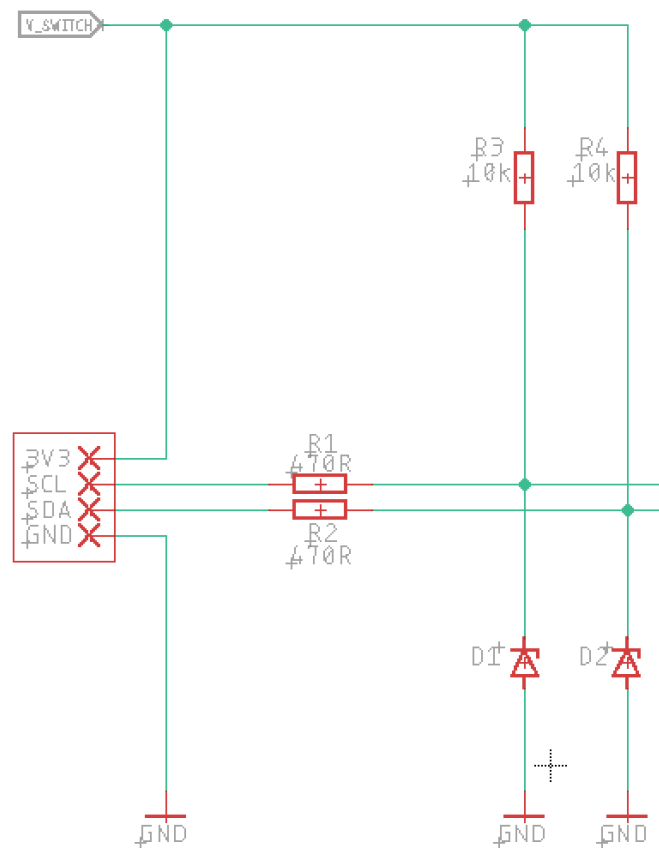
Senzor komunikuje s procesorom cez piny SDA a SCL, ktoré prechádzajú cez diódovo – rezistorovú ochranu vstupno-výstupných pinov. Ochrana funguje tak, že ak sa náhodou objaví na SDA vstupe napätie vyššie ako 3,3 V, tak na pin procesoru sa dostane referenčné napätie diódy a zvyšné napätie sa v rezistore R2 premení na teplo.

Príklad pre napätie 24 V:

$$P_{DD2} = \frac{U_{POR} - U_{ZN}}{R_2} \cdot U_{ZN} = \frac{24 - 3.3}{470} \cdot 3.3 = 0.145W \quad (3.1)$$

- kde P_{DD2} je výkon spotrebovaný na dióde
- U_{POR} je poruchové napätie priveden0 na pin procesoru
- U_{ZN} je Zenerovo napätie diódy

Diódy sú dimenzované na $P_D = 0,15$ W. Rezistory R3, R4 sú pullup rezistory pre I2C komunikáciu. Vetvou V_SWITCH je možné softwarovo vypnúť komunikáciu a senzor pre zníženie odberu energie, v momente keď nie je potrebné merať teplotu.

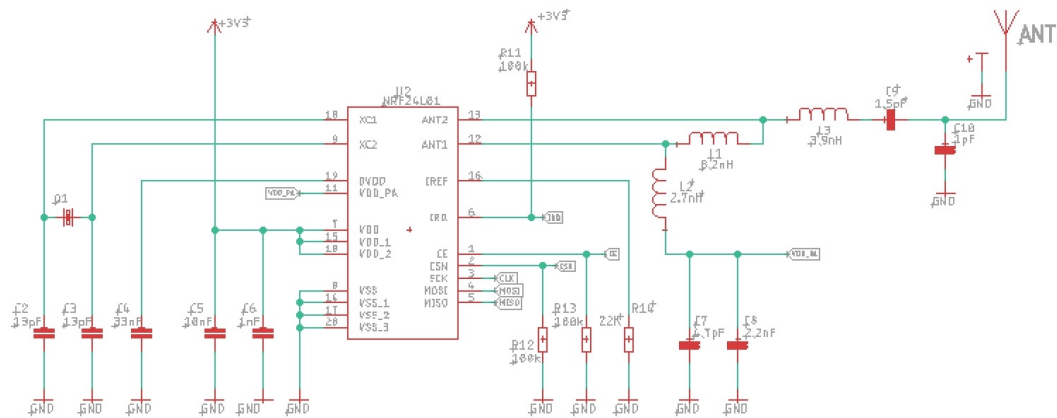


Obr. 3.3: Schéma senzoru spolu s ochranným obvodom

3.2.3 Bezdrôtový vysielač/prijímač nRF24L01

Pri počiatočných úvahách o návrhu teplotného modulu boli pri vysielači dve možnosti: použiť komunikačný modul s anténou a pripojiť ho k procesoru ako shield, alebo navrhnuť vysielač do spoločnej schémy. Po zvážení obidvoch možností, bola v rámci šetrenia priestoru a udržania vizuálnej celistvosti výsledného návrhu, zvolená druhá možnosť. Pri návrhu bolo vychádzané z odporúčanej schémy od výrobcu,

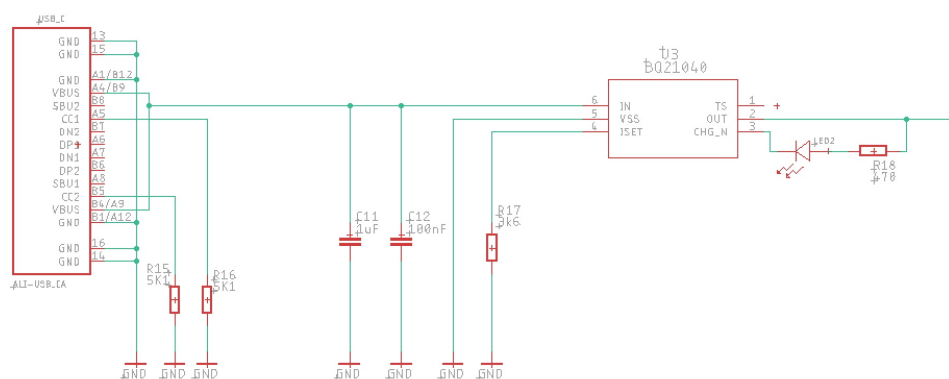
pridané bolo komunikačné rozhranie SPI. Signál VDD_PA je pomocný integrovaný zdroj napätia +1.8 V pre výkonové zosilnenie antény. Čip je taktovaný externým 16M Hz kryštálom.



Obr. 3.4: Schéma zapojenia nRF24L01

3.2.4 Nabíjanie batérie

Návrh nabíjacieho obvodu obsahuje USB-C konektor ktorý, je nastavený ako zariadenie, tzn. nemôže byť z batérie nabíjané iné zariadenie. USB-C bol zvolený, pretože je štandardne dostupný skoro pri všetkých zariadeniach a výhodou je možnosť zapojenia konektoru obidvoma smermi. Keďže USB-C je možné použiť ako aj zdroj tak aj zariadenie, ktoré výkon odoberá, je nutné nastaviť port pomocou pull-down rezistorov s hodnotou 5.1 k Ω , ktoré sú pripojené na piny CC1 a CC2[23].



Obr. 3.5: Schéma nabíjacieho obvodu

Nabíjací obvod ďalej pozostáva z nabíjacieho čipu, ktorého vstupné napätie je oddelené kondenzátormi C11 a C12. Signalizačná LED2 svieti počas nabíjania. Pin

TS je pre pridanie senzoru teploty na batériu, použitá batéria tento senzor nemá, takže ostáva nepripojený. Aby sa predišlo prehrievaniu, batérie bol zvolený nabíjací prúd 0.15 mA. Z toho je vypočítaný R17, ktorý nastavuje hodnoty prúdu od 50 mA pri R17 = 10,8 kΩ po 800 mA pri R17 = 675 Ω. Hodnota rezistoru sa vypočíta podľa vzorca:

$$R_{17} = \frac{K_{\text{ISET}}}{I_{\text{OUT}}} = \frac{540}{0.15} = 3600\Omega \quad (3.2)$$

KISET je nabíjací prúdový parameter, ktorého hodnota z datasheetu a pohybuje sa od 490 do 590, typicky 540 AΩ.

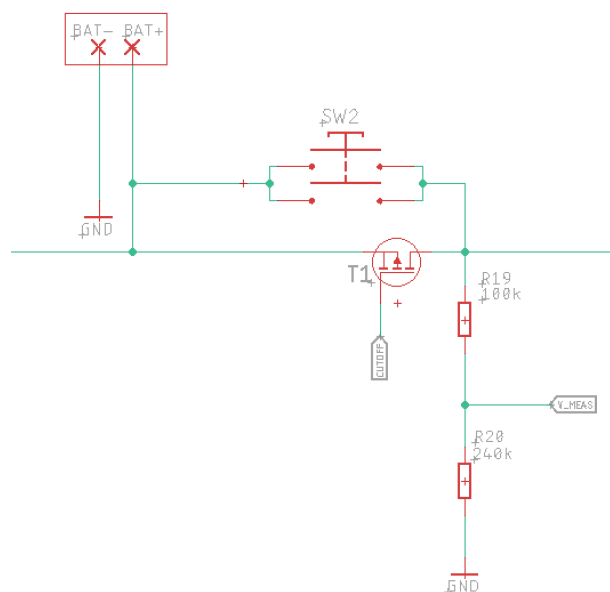
3.2.5 Odpájací obvod

Obvod odpojenia batérie je dôležitý pre bezpečnosť prevádzky zariadenia napájaného z Li-Pol batérie. Prevádzkové napätie batérie je od 4,2 do 3 V a pri poklese napätia pod hodnotu 3 V sa batéria stáva nestabilná a môže sa nenávratne zničiť. Rezistorový napäťový delič je dimenzovaný tak, aby pri plnom nabití batérie bolo na vetve V_MEAS napätie

$$U_{\text{MEAS_MAX}} = U_{\text{BAT}} \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = 4.2 \cdot \frac{240000}{100000 + 240000} = 2,96V \quad (3.3)$$

a pri vybitej batérii napätie

$$U_{\text{MEAS_MIN}} = U_{\text{BAT}} \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = 3 \cdot \frac{240000}{100000 + 240000} = 2,12V \quad (3.4)$$

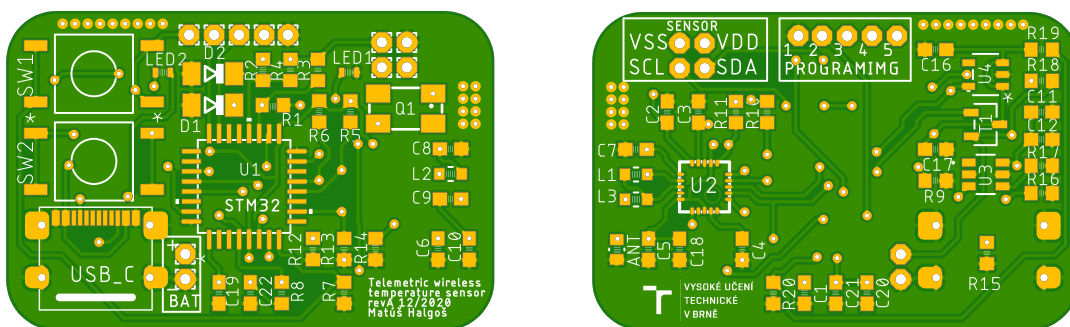


Obr. 3.6: Schéma odpájacieho obvodu

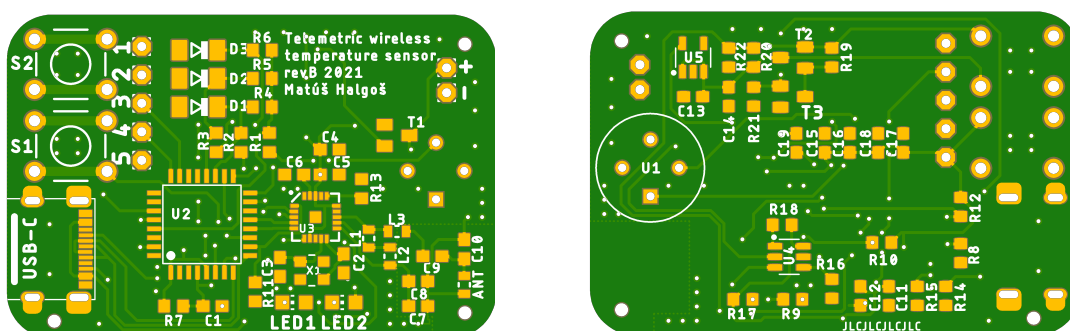
Vetva V_MEAS je napojená na vstup vstavaného 12-bitového A/D prevodníka mikroprocesoru, ktorý bitovú hodnotu prepočíta na napätie. Pri poklese napätia pod 3 V odpojí vetvu CUTOFF. Po opätovnom nabití batérie je potrebné stlačiť tlačidlo SW2, ktoré privedie napätie do regulátoru, čím obnoví funkciu mikroprocesoru a ten po zaznamenaní nabitej batérie zopne tranzistor T1.

3.3 DPS

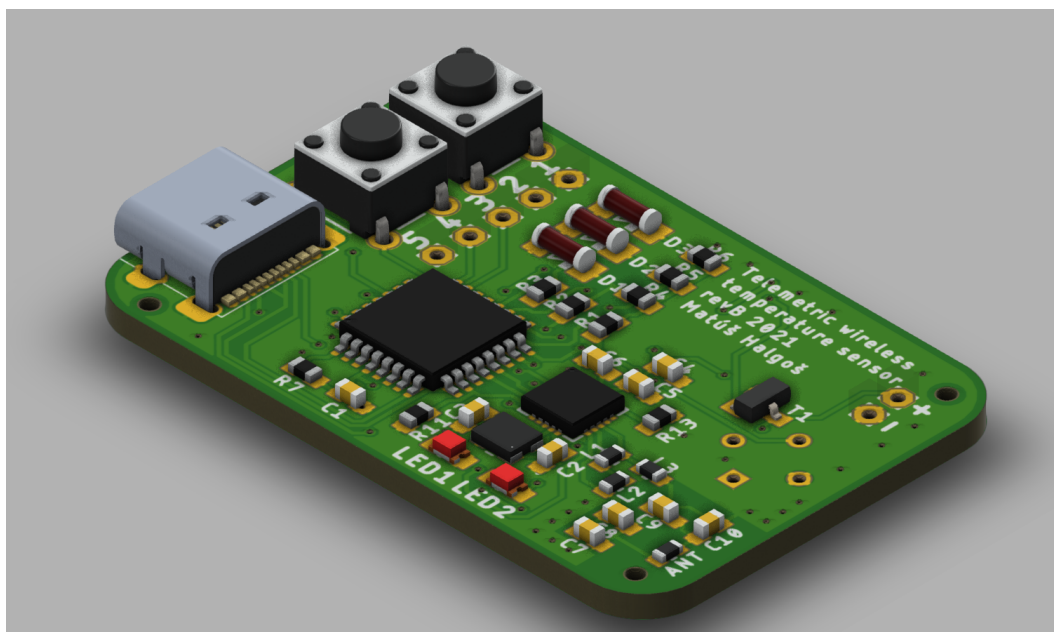
Doska plošných spojov bola navrhnutá tak, aby spĺňala výrobné kapacity firmy JLC PCB. Jedná sa o obojstrannú dosku s rozmermi 38 x 25.5 mm. Prevažná väčšina súčiastok je SMT typu. Pasívne súčiastky sú veľkosti 0603 inch (16 x 08 mm). Tranzistor, napäťový regulátor a nabíjací obvod sa nachádzajú v puzdre SOT-23. Puzdro MCU je typu LQFP32 a vysielateľ v QFN20 o veľkosti 4x4 mm. Konektor pre USB-C má podporné THT piny, aby sa pri manipulácii konektor neoddělil od dosky. Hrúbka všetkých ciest je 0.254 mm a veľkosť prekovov, ktoré spájajú vrchnú vrstvu so spodnou je 0.7 mm vo vonkajšom priemere a 0.35mm vo vnútornom priemere diery. Sekcia „PROGRAMING“ slúži pre programovacieho zariadenia od spoločnosti STM na piny procesoru 1 - 0V; 2 - NRST; 3 - SWDIO; 4 - SWCLK; 5 - +3V3. Obidve vrstvy DPS majú prepojený nulový potenciál pomocou polygónu a nezávislých prekovov pre zabezpečenie čo najmenšieho odporu. Pôvodná doska prešla revíziou, z pôvodných 38 x 25,5mm na 43 x 29,5 mm hlavne kvôli tomu aby sa rozloženie súčiastok v okolí NRF24L01 čo najviac zhodovalo s overeným návrhom NRF modulu.



Obr. 3.7: Pôvodná DPS



Obr. 3.8: DPS po revízií



Obr. 3.9: Vrchná strana návrhu dosky plošného spoja z programu Fusion 360

4 Požiadavky na software

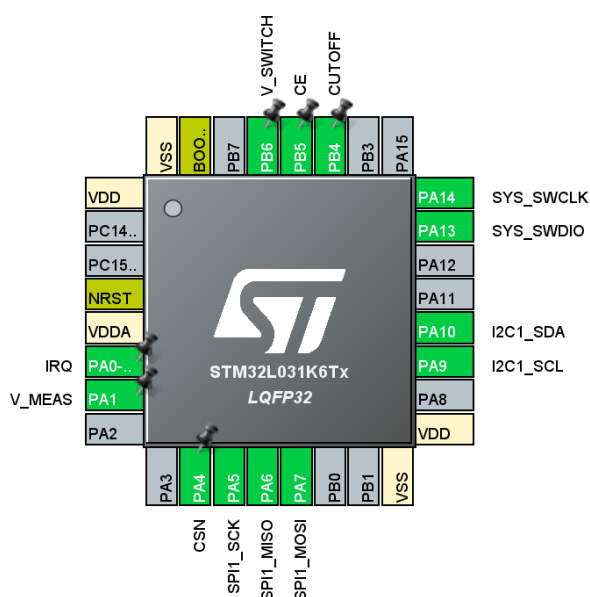
Software navrhnutý pre potreby tejto práce by mal pomocou navrhnutého zariadenia umožniť užívateľovi získavať hodnoty teploty pneumatiky odosielaním tejto informácie každých 10 sekúnd na datalogger nachádzajúci sa v jeho blízkosti. Software by mal ďalej sledovať stav batérie a pri vybití pod určenú hodnotu zariadenie vypnúť. Funkcia software sa overí získaním hodnoty teploty z bezdotykového snímača MLX90614 a odoslaním tejto hodnoty do vysielacieho registru vysielča nRF24L01. Zariadenie by malo byť možné prepnúť v čase nepoužívania do režimu spánku. Prechod do tohto stavu a jeho následné prerušenie by malo byť užívateľovi oznámené blikaním intergovanej LED.

5 Návrh software

Táto kapitola sa zaoberá návrhom programu pre procesor STM32L031K6 a vysvetlením použitých funkcií.

5.1 Programovacie prostredie

Software pre bezdrôtový telemetrický senzor bol navrhnutý v programovacom jazyku C, vo vývojovom prostredí pre procesory STM – STM32CubeIDE. Použitie tohto prostredia má výhodu pri počiatočnom nastavovaní procesora, pretože jednotlivé piny procesora môžu fungovať vo viacerých módoch. Tieto módy, či už sa jedná o komunikáciu (SPI, I2C), vstupno-výstupné piny (GPIO), alebo sériový debug (SWD), sú následne pridelené v grafickom prostredí, ktoré im túto funkciu pridelí generovaním časti kódu do zdrojového kódu. V grafickom prostredí je tiež možné pridať vnútorné pull-up alebo pull-down rezistory, nastaviť A/D prevodník a frekvenciu, ktorou bude mikroprocesor taktovaný.



Obr. 5.1: Rozloženie vstupno výstupných pinov v prostredí STM32cubeIDE

5.2 Knižnica HAL

Hardware abstraction layer knižnica, obsahujúca sadu najpoužívanejších funkcií pre bezproblémovú komunikáciu s procesorom a jeho rozhraniami, pričom zachováva

rýchlosť a efektivitu procesora. Program začína funkciou

Výpis 5.1: Funkcia inicializujúca prostredie HAL

```
HAL_INIT();
```

ktorá inicializuje periférie, naplní cache a generuje prerušenie na základe nastaveného hodinového pulzu.

5.3 HAL_GPIO

Jednou zo základných častí knižnice HAL je HAL_GPIO (general-purpose input/output), ktorá zaistuje komunikáciu s vstupno-výstupnými perifériami. V rozhraní STM32cubeIDE sa každému pinu priradí jeho funkcia. Procesor použitý pre účely tejto práce obsahuje dve GPIO periférie: GPIOA – piny 0-15 a GPIOB – piny 0-7. Najčastejšie používanou funkciou je

Výpis 5.2: Funkcia nastavujúca konkrétny GPIO pin

```
HAL_GPIO_WritePin();
```

ktorej parametrami sú periféria napr. GPIOB, konkrétny pin napríklad GPIO_PIN_5 a stav logická 0 alebo 1.

5.4 HAL_SPI

Pre komunikáciu s vysielacom NRF24L01 je použitý komunikačný protokol SPI, implementovaný pomocou funkcií HAL_SPI. V prostredí ST32cubeIDE je možné meniť baud rate od cca 8.2 kbit/s až po 16 Mbit/s v závislosti od nastavenej rýchlosti hodinového signálu. Komunikácia a inštruovanie vysielča je založená na zapisovaní hodnôt do príslušných registrov. Zapisovanie do registru začína nastavením CSN (chip select non) na logickú 0. Nasleduje funkcia

Výpis 5.3: Funkcia odosielaajúca hodnoty po zbernici SPI

```
HAL_SPI_Transmit();
```

ktorá berie ako parametre ukazovateľ na danú SPI perifériu (v prípade že MCU disponuje viacerými SPI perifériami). Ďalší parameter je ukazovateľ na pole hodnôt, tak že prvý prvok v poli je adresa registra, do ktorej sa má hodnota zapísať a druhý a tretí prvok obsahujú odosielanú správu, v závislosti od počtu odosielaných bytov. Tretím parametrom funkcie je počet odosielaných bytov, štvrtý parameter predstavuje čas po ktorý sa bude funkcia pokúšať o odoslanie. Pri odosielaní je aktívny pin

MOSI a v synchronizácii s hodinovým signálom naplní požadovaný register odosielanou hodnotou. Po ukončení komunikácie sa CSN pin opäť prepne na hodnotu log. 1. Pri vysielaní je nutné nastaviť vysieláč do TX módu, v ktorom bude pripravený na vysielanie paketov a to tak že, bit registru PRIM_RX bude nastavený na log. 0, TX FIFO bude naplnený hodnotami na odoslanie a po privedení aspoň 10 µs pulzu na pin CE dáta odošle a prepne sa naspäť do power down režimu. Vyššie popísaná funkcia slúži na priblíženie komunikácie na najnižšej úrovni. Pri ďalšom postupe návrhu software budú pre túto prácu použité voľne dostupné knižnice pre procesor STM32. V knižnici najskôr bolo nutné urobiť zopár úprav, hlavne pri vstupno-výstupných pinoch, ktoré boli pôvodne oba na rozhraní GPIOA a prispôsobenie pre použitie na procesory STM32L0. Nastavovanie vysieláča prebieha rovnako cez rozhranie SPI cez ktoré sa prístupuje do registrovej mapy. Vysieláč je nainicializovaný pomocou funkcie,

Výpis 5.4: Funkcia nastavujúca počiatočný stav NRF24L01

```
NRF24_begin();
```

ktorá najskôr naplní registre počiatočnými hodnotami, nastaví vysielací výkon a rýchlosť toku dát. Následne sa pomocou funkcie

Výpis 5.5: Funkcia nastavujúca počiatočný stav NRF24L01

```
stopListening();
```

vysieláč nastaví do vysielacieho módu a zavolaním funkcie

Výpis 5.6: Funkcia nastavujúca počiatočný stav NRF24L01

```
NRF24_write();
```

odošle dáta ktoré boli uchované v registri typu TX FIFO.

5.5 Registre MLX + I2C

Teplotný senzor MLX90614 pre svoju komunikáciu používa komunikačné rozhranie I2C. Hodnotu teploty z registra senzora vyčíta funkcia,

Výpis 5.7: Funkcia, ktorá získava hodnoty z registru po zbernici I2C

```
HAL_I2C_Mem_Read();
```

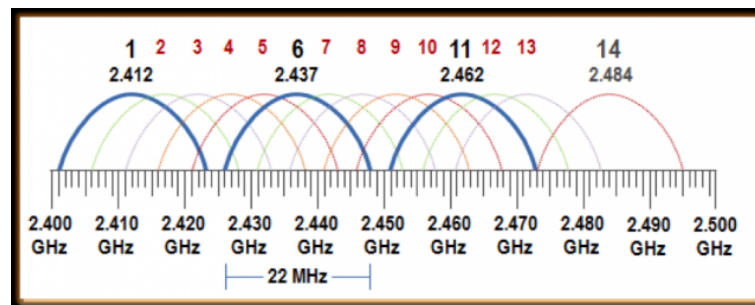
ktorá používa ako prvý ukazovateľ na I2C perifériu, druhý parameter adresu zariadenia, keďže po jednej linke môže komunikovať až 127 zariadení. V prípade MLX90614 je táto adresa 0x5A a nie je možné ju zmeniť, tým pádom jednou I2C linkou je možné komunikovať len s jedným takýmto senzorom. Ďalším parametrom funkcie je

register senzoru, v ktorom sa uchovávajú hodnotu teploty meraného objektu, alebo teploty okolia. Adresa registra pre okolitú teplotu je 0x06 a adresa teploty meraného objektu je 0x07. Ďalšími parametrami sú adresa MCU na ktorú sa má požadovaná hodnota zapísať. Poslednými parametrami sú veľkosť očakávanej hodnoty a čas, po ktorý sa procesor bude pokúšať hodnotu vyčítať. Návratovou hodnotou registra je 16- bitový neznamienkový integer, ktorý reprezentuje teplotu objektu na rozsahu od 203.15 do 653.15 K s rozlíšením 0.02 °C. Pre získanie výslednej teploty v °C je nutné vynásobiť decimálnu hodnotu registra 0.02 a odčítať 273.15. K príkladu, z registra 0x07 je vyčítaná hodnota 0x39A8, ktorá prináleží 14 760d

$$t_{\text{obj}} = \text{reg}_{\text{dek}} \cdot 0,02 - 273,15 = 14760 \cdot 0,02 - 273,15 = 22,05^{\circ}\text{C} \quad (5.1)$$

5.6 Pripojenie k dataloggeru

Vysielač NRF24L01 pracuje na vysielacej frekvencii 2,4 GHz. Rovnaké frekvenčné pásmo pre svoju funkciu využívajú aj technológie ako Bluetooth, Wifi, bezdrôtové vysielačky, či diaľkovo ovládané modely. Napríklad Bluetooth využíva 80 vysielacích kanálov od 2,4 do 2,48 GHz každý o šírke 1 MHz. Preto, aby zariadenie bolo schopné



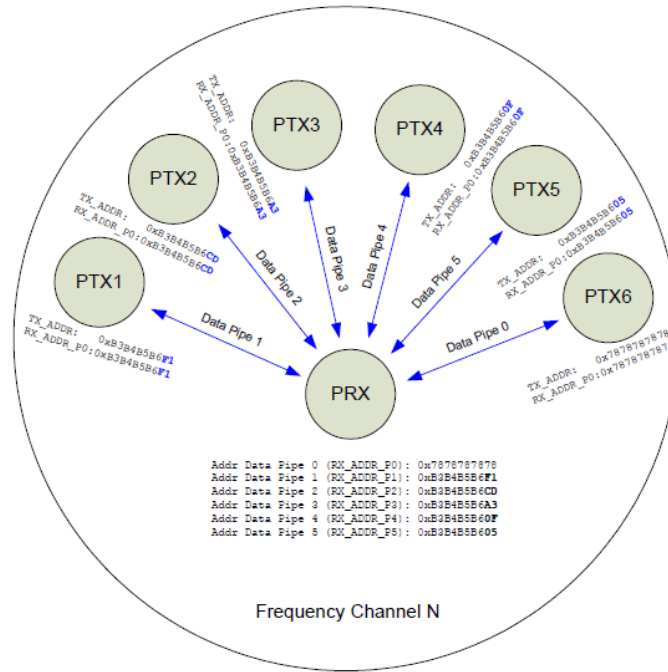
Obr. 5.2: Ukážka prekrývajúcich sa pásiem [24]

komunikovať s dataloggerom, musia byť obe zariadenia nastavené na rovnakom kanále. Nastavenie zariadenia na správny kanál zaistí funkcia,

Výpis 5.8: Funkcia nastavujúca komunikačný kanál

```
NRF24_setChannel();
```

ktorej parametrom je práve číselná hodnota kanálu. Aby sa predišlo nepriaznivému rušeniu zo strany Wifi alebo Bluetooth je nutné zvoliť pásmo, ktoré nie je využívané týmito technológiami. NRF24L01 disponuje až šiestimi paralelnými receiving pipe a každá z nich má vlastnú adresu na základe ktorej je prijímač schopný dekódovať prijímanú správu. Je nutné nastaviť, aby register vysielacieho zariadenia obsahoval rovnakú adresu ako register prijímacieho zariadenia.



Obr. 5.3: Adresovanie RX, TX registrov [18]

5.7 Priebeh programu

Po pripojení napájania a spustení programu sa najskôr inicializuje procesor zahrnutím potrebných knižníc, inicializovaním vstupno – výstupných pinov a nastavením frekvencie vnútorného oscilátora. Následne sa spustia funkcie zodpovedné za nastavenie vysielача do počiatočného stavu. V nasledujúcom kroku začína samotný while cyklus, zistením aktuálneho stavu batérie. Pokiaľ je hodnota menšia ako minimálna hodnota napätia batérie, tak prebehne odpojenie batérie porovnaním vstupu V_SWITCH z napäťového deliča R20, R22, ktoré je privedené na vstup A/D prevodníka. Požadované odpojenie batérie je pri 3 V, čo zodpovedá 2,12 V z napäťového deliča. Hodnota digitálneho vstupu bola získaná podľa vzorca

$$ADC_{READ} = \frac{ADC_{RES}}{U_{SYS}} \cdot U_{ANALOG} = \frac{4096}{3.3} \cdot 2.12 = 2631 \quad (5.2)$$

kde:

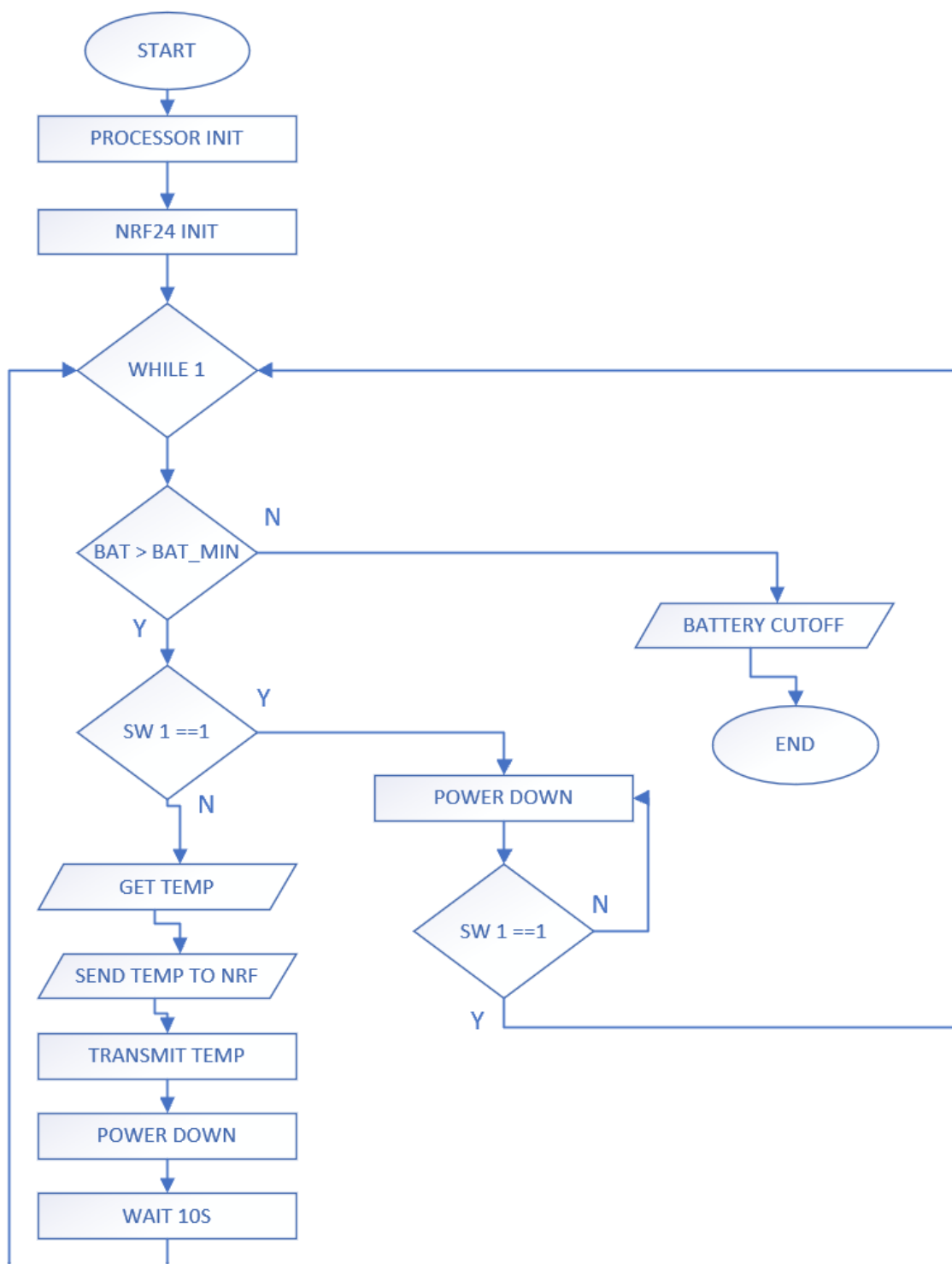
- ADC_{READ} požadovaná hodnota na vstupe A/D prevodníka
- ADC_{RES} je rozlíšenie A/D prevodníka (12-bit)
- U_{SYS} reprezentuje napätie systému
- U_{ANALOG} je napätie z deliča R20, R22

Ak je hodnota napätia batérie väčšia ako minimálna hodnota napätia batérie, program pokračuje ďalším krokom v ktorom, bude prebiehať získavanie teploty meraného

objektu a odoslanie do vysielacieho čipu, kde sa dáta zhromaždia pred následným odoslaním do dataloggeru. Táto slučka sa cyklicky vykonáva každých 10 sekúnd až do momentu, keď sa napätie na batérii dostane pod hranicu 3 V, alebo pokiaľ užívateľ neprepne zariadenie do power down módu.

5.7.1 Power down módu

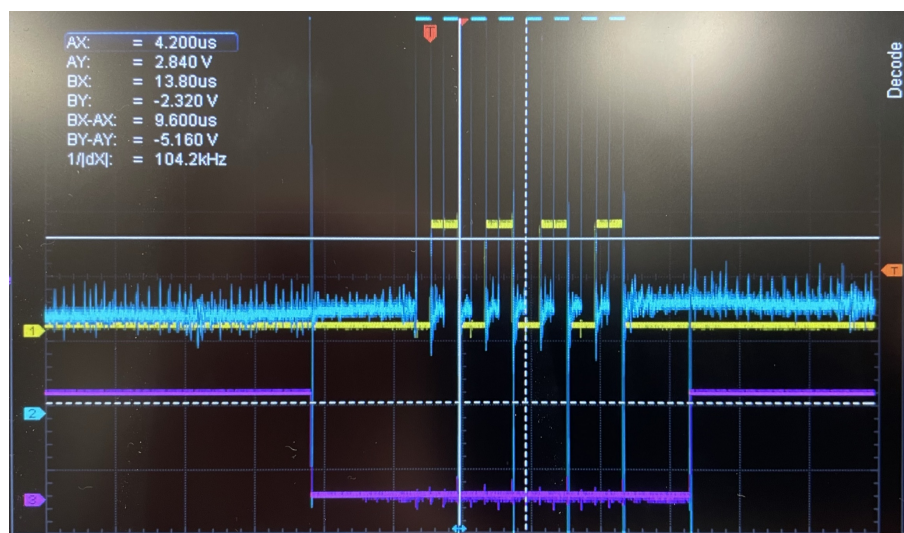
Pre spustenie power down módu podrží užívateľ tlačidlo č.1 a tým prepne zariadenie do režimu šetrenia energie, v ktorom zariadenie prestane vysielat, odpojí sa napájacia vetva snímača a vysielateľ sa prepne do režimu spánku. Znamenie o vstupe zariadenia do tohto režimu bude signalizovať LED č. 1 tromi dlhými (300 ms) prerušovanými svetelnými signálmi. Pre opätovné spustenie užívateľ znova podrží tlačidlo č. 1 a dióda dá znamenie tromi krátkymi (100 ms) prerušovanými svetelnými signálmi.



Obr. 5.4: Vývojový diagram chodu programu

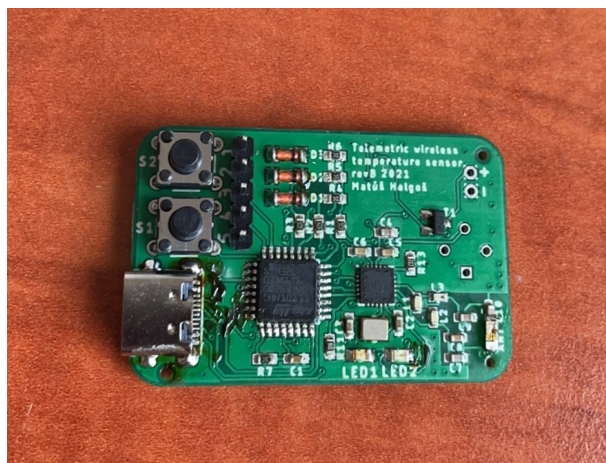
6 Priebeh oživovania

Po osadení zadnej strany príslušnými súčiastkami bolo na rade prvé oživenie zariadenia. Dodaný senzor sa nachádza na malej DPS, ktorá prevádza komunikáciu z 3,3 V na 5 V. Po neúspešnom pokuse o odpájkovanie senzoru z DPS som dospel k názoru, že senzor je k doske prilepený, takže som sa už ďalej nepokúšal o vybratie senzoru, z DPS ale pripojil som prepojovacie káble priamo k senzoru. Oživenie zariadenia prebiehalo v laboratóriu UAMT. Cez externé programovacie piny SWD bol pripojený programátor ST-LINK V2. V prvom rade bolo potrebné zistiť, či je možné komunikovať medzi počítačom a mikroprocesorom. Pomocou programovacieho prostredia STM32CubeProgrammer, ktoré má priamy prístup k registrom, som si po nahratí programu overil, že sa po nahratí programu zmenili registre od 0x08000000, čo znamenalo úspešné nahratie programu. V nasledujúcom kroku som vytvoril jednoduchý skript na overenie funkcie GPIO rozhrania, ktorý pomocou spínača zapínal LED. Následne bolo potrebné otestovať komunikáciu SPI a I2C. Zavolaním funkcie `HAL_SPI_Transmit()` som do vysielача zapísal hodnotu 0x55.



Obr. 6.1: Odoslanie jedného bytu (0x55), modrá-SCK, žltá-MOSI, fialová-CE

Pri pokuse vyčítať hodnotu z tepelného senzoru som narazil na problém, pri ktorom nebolo možné hodnotu vyčítať. Pri napojení periférie na osciloskop som však bol schopný vysielaný signál zachytiť. Pri bližšom preskúmaní som si všimol, že v JLC PCB osadili namiesto ochranných rezistorov R1, R2, R3 požadovanej hodnoty 470R hodnotu 470k. Rezistory tak zamedzovali priechodu akéhokoľvek signálu. Po vymenení rezistorov a zavolaní funkcie `MLX90614_ReadTemp()` som bol schopný hodnotu registra vyčítať.



Obr. 6.2: Fotka plne osadenej dosky

6.1 Pribeh testovania funkčnosti

Kedže mikroprocesory M0 nepodporujú SWV (Serial Wire Viewer), otestovanie funkčnosti prebiehalo krokovým debugovaním. Pre tieto účely bol vo funkcii Main vytvorený testovací kód,

Výpis 6.1: Funkcia odosielaajúca hodnoty po zbernici SPI

```
while(1){

    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, V_SWITCH_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(300);
    objectTemp = MLX90614_ReadTemp(addr, obj);

    NRF24_write_register(REG_TX_ADDR, objectTemp);
    HAL_Delay(200);
    receivedTemp= NRF24_read_register(REG_TX_ADDR);
}
```

ktorého úlohou je do vopred vytvorenej premennej objectTemp uložiť hodnotu registra teploty objektu, následne ju zapísať do REG_TX_ADDR. Posledným krokom testovania bolo zavolanie funkcie na vyčítanie hodnoty z daného registra.

Name	Type	Value
objectTemp	float	32.6899986
receivedTemp	float	32

Obr. 6.3: Výstrižok z debugovacieho prostredia

Na obrázku 6.3 sú zobrazené hodnoty nameranej teploty po skončení jedného cyklu testovacieho kódu.

Záver

Náplňou bakalárskej bolo navrhnuť, vyrobiť a naprogramovať telemetrický bezdrôtový senzor teploty pneumatík. V prvej časti som sa venoval zbieraniu informácii o dataloggeroch, ich dostupnosťou a rozsahom použitia. Ďalej som sa zoznámil s rôznymi druhmi merania teploty a získané informácie som následne využil pri výbere teplotného senzoru. Na základe parametrov senzoru som následne vybral komponenty, ktoré senzor potrebuje k fungovaniu. Jednalo sa o procesor, ktorý komunikuje a spracováva dáta senzoru, vysielač čip a prvky, ktoré do systému dodávajú výkon. Pri výbere súčiastok bol kladený dôraz na ich čo najmenšie rozmery a nízky odoberaný výkon.

V ďalšej časti bola popísaná funkčnosť jednotlivých použitých súčiastok. Pri návrhu schémy som vychádzal z dokumentácie dodávanej výrobcom súčiastok. Najviac času som strávil pri dizajne dosky plošných spojov, ktorá prešla odhadom desiatimi iteráciami. Najväčší dôraz som kládol na malé rozmery dosky, ktoré ale zároveň zachovali pohodlné osádzanie súčiastok. V poslednej kapitole som sa venoval návrhu programovej časti, vysvetleniu použitých funkcií a priebehu oživovania zariadenia. Meranie spotreby ukázalo, že pri nameranom odoberanom prúde 0,78 mA by zariadenie pri batérii s kapacitou 240 mAh vydržalo vysielať 307 hodín, čo predstavuje približne 12 dní a 19 hodín stálej prevádzky.

Bakalárska práca mala pre mňa veľký prínos v tom, že som si mal možnosť vyskúšať kompletný návrh zariadenia až po jeho programové riešenie a tiež vyskúšať rôzne typy komunikácie medzi zariadeniami. Pri budúcom vývoji DPS by som určite zakomponoval servisné piny minimálne na komunikáciu medzi procesorom a ťažšie prístupnými súčiastkami, čo by značne zjednodušilo oživovanie DPS. S bakalárskou prácou som sa zúčastnil aj online verzie súťaže EEICT, kde som mal možnosť si vyskúšať prezentáciu návrhu pred komisiou a publikom.

Literatúra

- [1] MODONI D.; TERKAJ W.; SACCO M.: *A Telemetry-driven Approach to Simulate Data-intensive Manufacturing Processes* [PDF] [online]. 10/2007, [cit. 7.5.2021]. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/312026537_A_Telemetry-driven_Approach_to_Simulate_Data-intensive_Manufacturing_Processes>
- [2] *Obrázok 2..* Dostupné z URL: <<https://www.pngaaa.com/detail/51816>>
- [3] ROLINGER M.: *Datalogging – záznam dat z jízdy*[online]. Dostupné z URL: <<https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/datalogging-zaznam-dat-z-jizdy-26949.html>>
- [4] *Produkt: AiM EVO5 Motorcycle Racing Data Logger.* Dostupné z URL: <<https://www.aimshop.com/collections/motorcycle-data-loggers/products/aim-evo5-motorcycle-racing-data-logger>>
- [5] *Produkt: AiM Infrared Tyre Temperature Sensor.* Dostupné z URL: <<https://www.aimshop.com/collections/motorcycle-temperature-sensors/products/aim-infrared-tyre-temperature-sensor-car>>
- [6] PAUWELUSSEN,J.P.; DALHUIJSEN W.; MERTS M.: *Tyre dynamics, tyre as a vehicle component Part 1.: Tyre handling performance* [PDF] [online]. 10/2007, [cit. 12.11.2020]. Dostupné z URL: <https://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/tyre_as_car_component.pdf>
- [7] Continental: *Vliv teploty na provozní životnost pneumatik* [PDF] [online]. [cit. 12.11.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.rajpneu.cz/galerie/gp-20140721162248-Vliv-teploty-na-zivotnost-Continental.pdf>>
- [8] VOJÁČEK, A.: *Přehled principů el. měření teploty - 1. díl* [PDF] [online].05/2014 [cit. 22.11.2020]. Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>>
- [9] VOJÁČEK, A.: *Přehled principů el. měření teploty - 2. díl - bezdotykové* [PDF] [online].05/2014 [cit. 22.11.2020]. Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykov>>
- [10] GRUNER K.D.: *Principles of Non-Contact Temperature Measurement* [PDF] [online].12/2003 [cit. 22.11.2020]. Dostupné z URL: <<https://pdf4pro.com/download/principles-of-non-contact-temperature-measurement-4f3cac.html>>

- [11] TE Connectivity: *TS318-11C55 Thermopile Sensor* (datasheet) [PDF] [online].10/2015 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z URL: <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FTS318-11C55%7FA%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_TS318-11C55_A.pdf%7FG-TPC0-032>
- [12] TE Connectivity: *TS418-1N426 Thermopile Sensor* (datasheet) [PDF] [online].10/2015 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z URL: <https://www.mouser.sk/datasheet/2/418/5/NG_DS_TS418-1N426_A-1074562.pdf>
- [13] Melexis: *MLX90614 family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39* (datasheet) [PDF] [online].06/2015 rev.009 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.mouser.sk/datasheet/2/734/MLX90614-Datasheet-Melexis-953298.pdf>>
- [14] Amphenol Advanced Sensors: *ZTP-135L Thermopile IR Sensor* (datasheet) [PDF] [online]. 06/2014 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.mouser.sk/datasheet/2/18/AAS-920-553A-Thermometrics-ZTP-135L-032114-web-1315808.pdf>>
- [15] Amphenol Advanced Sensors: *ZTP-135BS Thermopile IR Sensor* (datasheet) [PDF] [online]. 06/2014 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z URL: <[10]<https://www.mouser.sk/datasheet/2/18/AAS-920-593A-Thermometrics-ZTP-135BS-032014-web-1315873.pdf>>
- [16] Amphenol Advanced Sensors: *ZTP-135H Thermopile IR Sensor* (datasheet) [PDF] [online].06/2014 [cit. 05.12.2020].
- [17] Texas Instruments: *Understanding the I2C bus* [PDF] [online].©2020 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z URL: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1608596646381&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F> Dostupné z URL: <<https://www.mouser.sk/datasheet/2/18/AAS-920-552A-Thermometrics-ZTP-135H-032114-web-850494.pdf>>
- [18] NORDIC Semiconductor: *Single chip 2.4 GHz Transceiver nRF24L01* [PDF] [online].03/2006 [cit. 29.11.2020]. Dostupné z URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/nRF24L01_prelim_prod_spec_1_2.pdf>
- [19] Analog Devices, DHAKER,P.: *Introduction to SPI Interface* [PDF] [online].©2020 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-3/introduction-to-spi-interface.pdf>>

- [20] STMicroelectronics: *STM32L031x4 STM32L031x6, Access line ultra-low-power 32-bit MCU* (datasheet) [PDF] [online].©2018 rev.06 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l031k6.pdf>>
- [21] Texas Instruments: *TPS709 150-mA, 30-V, 1-μA IQ Voltage Regulators with Enable* (datasheet) [PDF] [online].03/2015 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps709.pdf?ts=1609325758956&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS709>
- [22] Texas Instruments: *bq21040 0.8-A, Single-Input, Single Cell Li-Ion and Li-Pol Battery Charger* (datasheet) [PDF] [online].04/2016 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq21040.pdf?ts=1609317766043&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>
- [23] Microchip: *Introduction to USB Type-C™* (datasheet) [PDF] [online].©2015 [cit. 07.12.2020]. Dostupné z URL: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001953a.pdf>>
- [24] Extreme: *2.4 GHz Channel Planning* [online]. Dostupné z URL: <<https://www.extremenetworks.com/extreme-networks-blog/2-4-ghz-channel-planning/>>

Zoznam symbolov a skratiek

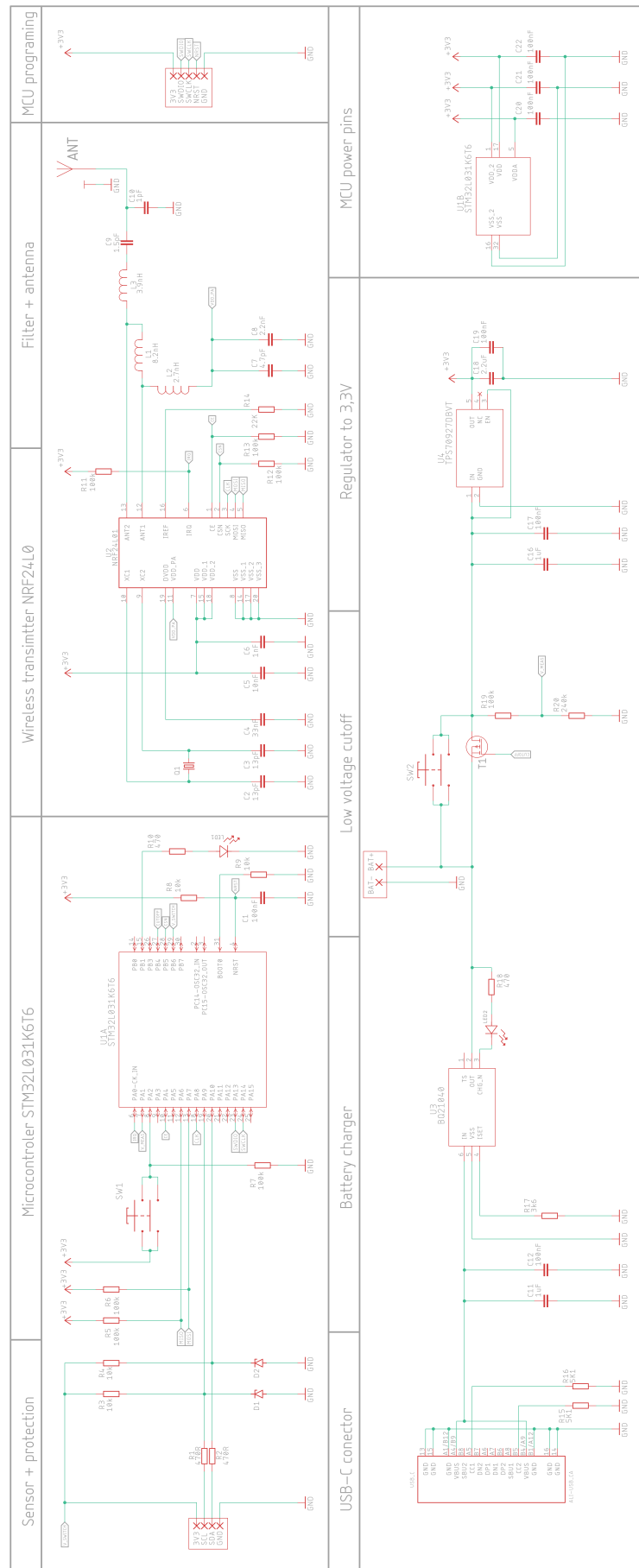
Skratky:

DPS	Doska plošného spoja
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
FOV	Pozorovací uhol
LED	Svetlo vyžarujúca dióda
LSB	Najmenej významný bit
MCU	Mikrokotrolérová jednotka
MSB	Najvýznamnejší bit
I2C	Dvojvodičová obojsmerná zbernica
PWM	Pulzná šírková modulácia
RAM	Pamäť s priamym prístupom
SCL	Seriový časový singál
SDA	Seriový dátový signál
STK	Stanica technickej kontroly
SPI	Seriové periférne rozhranie
SWD	Serial wire debug
VUT	Vysoké učení technické

Zoznam príloh

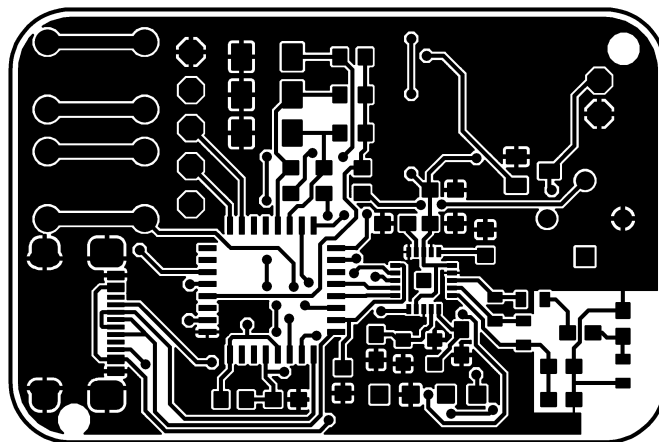
A	Schéma zapojenia	51
B	Doska plošných spojov	53
C	Obsah přiloženého CD	56

A Schéma zapojenia

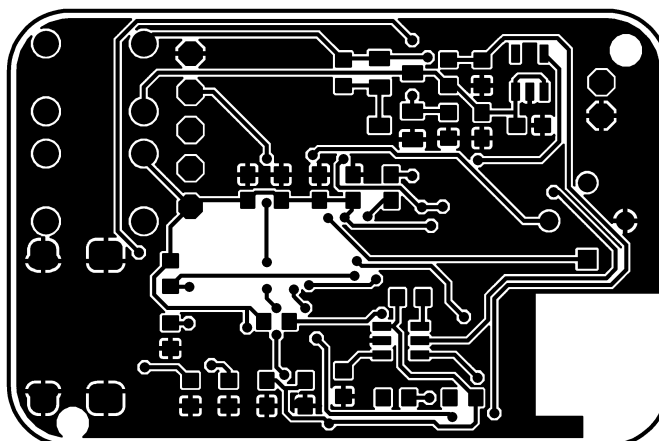


B Doska plošných spojov

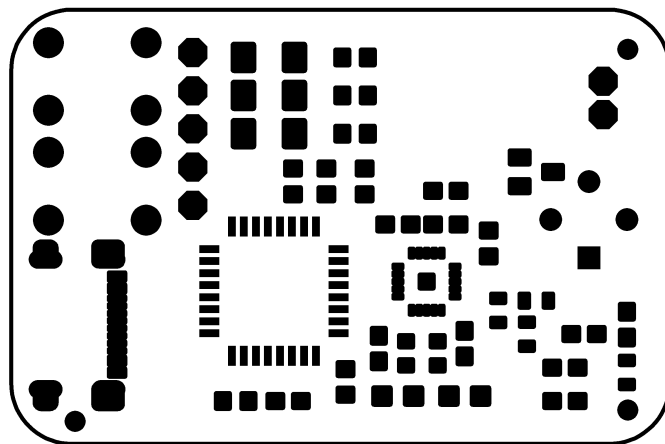
Zobrazenie DPS je v mierke 2:1.



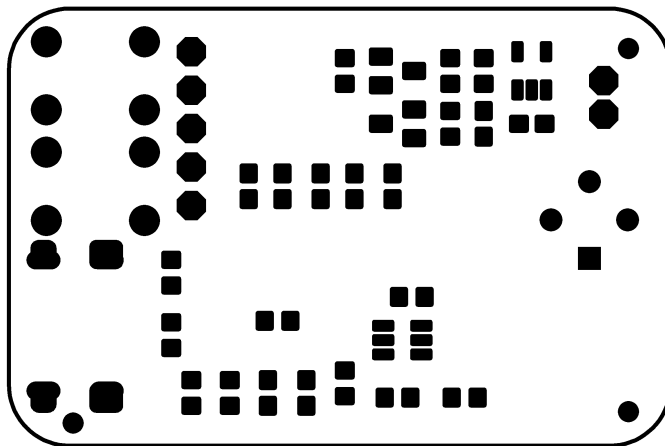
Obr. B.1: Vrchná vrstva medi - TOP



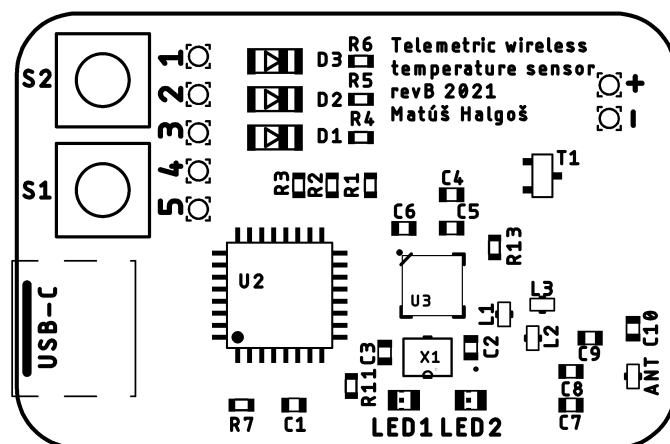
Obr. B.2: Spodná vrstva medi BOT



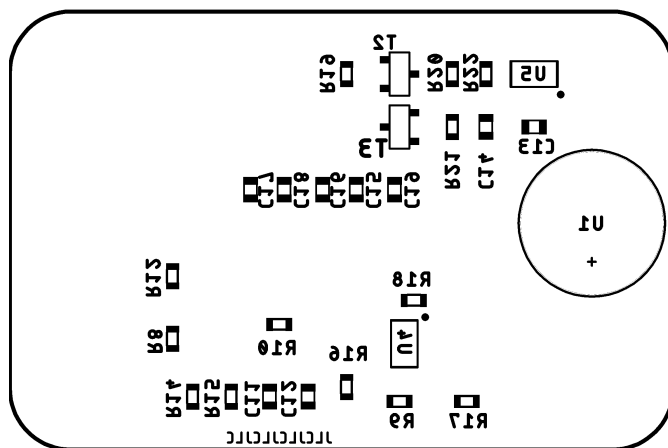
Obr. B.3: Soldermask - TOP



Obr. B.4: Soldermask - BOT



Obr. B.5: Plán osadzovania - TOP



Obr. B.6: Plán osadzovania - BOT

C Obsah přiloženého CD

```
/ ..... Adresár přiloženého CD
├── Telemetrický bezdrátový modul teploty pneumatik.pdf...digitální verzia BP
├── DPS
│   ├── tempModule.sch ..... schéma
│   └── tempModule.brd ..... DPS
├── Zdrojový kód
│   ├── main.c, main.h ..... programové riešenie
│   ├── mlx90614.c, mlx90614.h ..... knižnica senzoru
│   └── MY_NRF24.c, MY_NRF24.h, nRF24101.h ..... knižnica vysieláča
```